

4,
EP 98/6056

**PRIORITY
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)



EPO - DG 1

19 11. 1998

Bescheinigung

| | |
|-------|-------------|
| REC'D | 02 DEC 1998 |
| WIPO | PCT |

Herr Professor Dr. Ernst-Wilhelm O t t e n in Mainz/
Deutschland hat eine Patentanmeldung unter der Bezeichnung

"Transporteinrichtung für kernspinpolarisierte
Gase, insbesondere Edelgase, wie die Isotop
³He, ¹²⁹Xe"

am 26. September 1997 beim Deutschen Patentamt eingereicht.

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue
Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patent-
anmeldung.

Die Anmeldung hat im Deutschen Patentamt vorläufig die Sym-
bole G 01 R und A 61 B der Internationalen Patentklassifika-
tion erhalten.

München, den 25. September 1998
Der Präsident des Deutschen Patentamts
Im Auftrag

zeichnen: 197 42 548.8

Fixner

THIS PAGE BLANK (USPTO)

Transporteinrichtung für kernspinpolarisierte Gase,
insbesondere Edelgase, wie die Isotop ^3He , ^{129}Xe

5 Die Erfindung bezieht sich auf eine Magneteinrichtung, eine Speicherzelle
sowie eine Transporteinrichtung für kernspinpolarisierte Gase.

Kernspinpolarisierte Gase, wie das Heliumisotop der Massenzahl 3 (^3He) oder
das Xenonisotop mit der Massenzahl 129 (^{129}Xe) werden für eine Vielzahl von
Experimenten der physikalischen Grundlagenforschung benötigt. Auf dem
Gebiet der Medizin werden derartige Isotope insbesondere für eine
Anwendung in der Kernspintomographie beispielsweise der Lunge diskutiert.
Voraussetzung für die Anwendung derartiger kernspinpolarisierter Gase in der
Kernspintomographie ist ein Polarisationsgrad P der Spins I der Atomkerne
bzw. der damit verknüpften magnetischen Kerndipolmomente μ_I , der um 4-5
15 Größenordnungen größer ist, als er sich normalerweise im thermischen
Gleichgewicht im Magnetfeld B_T des Tomographen durch den
Boltzmannfaktor aus magnetischer Dipolenergie $-\mu_I B_T$ und mittlerer
thermischer Energie kT einstellt zu

$$P_{\text{Boltzmann}} = \tanh(\mu_I B_T / kT) \approx \mu_I B_T / kT \quad (1)$$

k = Boltzmannkonstante, T = absolute Temperatur

25 Während das in der Gewebetomographie benutzte Wasserstoffisotop ^1H bei
 $B_T = 1,5 \text{ T}$ und $T = 300 \text{ K}$ ein $P_{\text{Boltzmann}}$ von nur $5 \cdot 10^{-8}$ erreicht, wird in der
Gastomographie ein $P \geq 1 \cdot 10^{-2}$, d.h. 1 % verlangt. Die Forderung nach einem
so extrem überhöhten P ergibt sich in erster Linie aus der geringen
Konzentration der Gasatome im Vergleich zu der des Wasserstoffes im
Gewebe. Gase mit derartigen Polarisationsgraden können mit Hilfe geeigneter
30 Verfahren, vorzugsweise dem optischen Pumpen, bereitgestellt werden.

THIS PAGE BLANK (USPTO)

Außerdem müssen größere Gasmengen beispielsweise von der Größe eines Atemzuges (0,5 bis 1 Liter) für eine Anwendung zur Verfügung gestellt werden.

5 Besonders hohe Polarisationsgrade - beispielsweise $> 30\%$ - bei gleichzeitig hohen Produktionsraten z.B. 0,5 Liter/h wurden durch Kompression eines optisch gepumpten Gases erzielt. Dieses Verfahren ist in nachfolgenden Veröffentlichungen beschrieben, deren Offenbarungsgehalt vollumfänglich in die vorliegende Anmeldung mitaufgenommen wird:

- 10 - G. Eckert, W. Heil, M. Meyerhoff, E.W. Otten, R. Surkau, M. Werner, M. Leduc, P.J. Nacher, L.D. Schearer, "A dense polarized ^3He target based on compression of optically pumped gas", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 320 (1992) 53-65.
- 15 - J. Becker, M. Ebert, T. Grossmann, W. Heil, H. Humblot, M. Leduc, E.W. Otten, D. Rohe, M. Schäfer, K. Siemensmeyer, M. Steiner, R. Surkau, F. Tasset, N. Trautmann, "Development of a Dense Polarized ^3He Spin Filter Based on Compression of Optically Pumped Gas", J. Neutron Research, Vol. 5, (1996) 1-10.
- R. Surkau, J. Becker, M. Ebert, T. Grossmann, W. Heil, D. Hofmann, H. Humblot, M. Leduc, E.W. Otten, D. Rohe, K. Siemensmeyer, M. Steiner, F. Tasset, N. Trautmann, "Realization of a broad band neutron spin filter with compressed, polarized ^3He gas", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 384 (1997) 444-450.
- 25 - W.Heil, H.Humblot, E.W.Otten, M.Schäfer, R.Surkau, M.Leduc, "Very long nuclear relaxation times of spin polarized helium 3 in metal coated cells", Physics Letters A 201 (1995) 337-343

Es ergibt sich nun das Problem, die beispielsweise mit Hilfe des oben beschriebenen Verfahrens gewonnenen kernspinpolarisierten Gase zum
30 Verbraucher, beispielsweise einem Lungenkernspintomographen, zu transportieren.

homogenes Magnetfeld vorliegt, zu Gesamtvolumen der Magneteinrichtung erreichbar ist.

5 In einer ersten Ausführungsform der Erfindung beträgt dieses Verhältnis mindestens 1:5; bevorzugt 1:3 und in einer besonders vorteilhaften Ausführungsform 1:2. Hierbei wird als Homogenitätsbedingung in dem nutzbaren Volumen für den relativen transversalen Gradienten G_r des Magnetfeldes B_0 ein Wert von

$$G_r = ((\delta B_r / \delta r) / B_0) \leq 1,5 \times 10^{-3} / \text{cm} \quad (2)$$

bei einem Druck des polarisierten Gases von $p = 3$ bar zugrundegelegt. Diese Forderung resultiert aus der gradientenbedingten Relaxationszeit T_{1G} , die mit G_r und dem Gasdruck p in der Relation steht:

15

$$T_{1G} = p / G_r^2 \cdot (1,8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2 \text{ bar/h})^{-1} \quad (3)$$

Mit $G_r \leq 1,5 \cdot 10^{-3} / \text{cm}$ und $p = 3$ bar erreicht man nach Gleichung (3) eine gradientenbedingte Relaxationszeit von $T_{1G} > 750$ h.

20

Um Feldverzerrungen im Randbereich des Innenraumes der Magneteinrichtung zu kompensieren und so die Homogenität des Magnetfeldes zu verbessern, ist vorgesehen, daß die Magneteinrichtung magnetische Feldquellen umfaßt, die derart angeordnet sind, daß die Feldfehler in den Randbereichen des Magnetinnenraumes minimal sind und das Feld im Inneren des Magnetraumes weitgehend homogen ist.

25

Um die einmal erreichte Polarisation der Kernspins aufrechtzuerhalten, ist nur ein relativ schwaches, homogenes Magnetfeld nötig, das vorzugsweise eine Magnetfeldstärke von weniger als 1 mT aufweist. In einem derart schwachen

30

Magnetfeld kann insbesondere zuverlässig eine ständige Qualitätskontrolle des Polarisationsgrades mit Hilfe von Meßeinrichtungen betrieben werden.

5 Während die Erzeugung streng homogener Magnetfelder mit Hilfe ferromagnetischer Materialien sich bisher auf hohe Feldstärken im Teslabereich konzentrierte, richtet sich der Erfindungsgedanke der hier beschriebenen Magneteinrichtung gezielt auf eine möglichst effiziente und zweckdienliche Realisierung eines schwachen, großräumig homogenen Magnetfeldes mit Hilfe ferromagnetischer Materialien.

Im schwachen Feldbereich kann große Homogenität dann erzielt werden, wenn als homogenisierendes Ferromagnetikum zwei dünne μ -Metallplatten als Polschuhe verwendet werden, die dank ihrer extrem hohen Permeabilität und geringen Remanenz im Zwischenraum ein sehr homogenes Feld aufbauen.

15 Der homogenisierende Effekt dieser μ -Metallplatten kann durch Einbringen von magnetischen Widerständen zwischen Polschuh und Joch in einer besonders bevorzugten Ausführungsform verstärkt werden. Als bevorzugtes Material für einen derartigen magnetischen Widerstand schlägt die Erfindung vor, zwischen Polschuh und Joch je eine verformungsstabile, nicht-magnetische Schicht, beispielsweise in Form einer Platte, einzubringen. Wird eine derartige Platte oder zwecks Gewichtsersparnis vorzugsweise eine Wabenstruktur zusätzlich mit den Polschuhen verklebt, so garantieren dies deren Ebenheit.

25 Als besonders bevorzugt, um die oben genannten Homogenitätsbedingungen auf möglichst einfache Art und Weise zu erfüllen und gleichzeitig ein großes Speichervolumen zur Verfügung zu stellen, hat sich die Ausbildung der erfindungsgemäßen Magneteinrichtung in Form eines Topfmagneten
30 herausgestellt. Eine derartige Magneteinrichtung besteht im wesentlichen aus einem geschlossenen Topf, der in einer beispielhaften Ausführungsform einen

Durchmesser von 30-60 cm bei einer Gesamthöhe von 10-30 cm aufweisen kann. Der besondere Vorteil einer Ausbildung der Magneteinrichtung als Topfmagnet liegt in der hohen Symmetrie dieser kreiszylindrischen Ausführungsform. Als besonders bevorzugte Anordnungen der Feldquellen kommen bei einem derartigen Topfmagneten zwei Möglichkeiten in Frage:

- die Anordnung der Feldquellen, beispielsweise in Form von handelsüblichen Permanentmagnetplatten auf einem Spalt in der Mittel- bzw. Spiegelebene des Topfes; sowie
- die Anordnung der Feldquellen in Stirnposition auf den Topfböden.

Durch eine geeignete Aufteilung der Feldquellen auf diese beiden Anordnungen, zum einen Anordnung in der Mittelebene, zum anderen Anordnung in den Stirnpositionen auf den Topfböden, ist es möglich, die Randfehler des Magnetfeldes im Inneren des Topfmagneten zu korrigieren und so die Homogenitätsbedingung über einen in radialer Richtung weiten Bereich zu erfüllen. Eine bevorzugte Aufteilung ist gerade derart, daß der Randfeldzuwachs, der bei einer Anordnung der Feldquellen auf der Spiegelebene bzw. der Mitte des Topfmagneten im Randbereich entsteht, gerade durch den Randabfall bei einer Anordnung der Feldquellen auf den Topfböden kompensiert wird.

Ein besonders homogenes Randfeld wird auch erreicht, wenn man eine magnetische Blende, z.B. einen Weicheisenring, zwischen Topf und Polschuhrand vorsieht, so daß ein von außen eingestreutes Feld teilweise kurzgeschlossen wird und bei einer Anordnung der Feldquellen auf der Mittelebene des Topfmagneten durch geeignete Dimensionierung der magnetischen Blende der Wert des Randfeldes auf den Wert des Zentralfeldes in der Mitte des Topfmagneten zurückgeführt wird.

Als magnetische Feldquellen gibt es zwei bevorzugte Ausführungsformen. In einer ersten Ausführungsform können hierfür Permanentmagnete,

vorzugsweise handelsübliche Tabletten, beispielsweise mit einer Höhe von 5 mm und mit einem Durchmesser von 20 mm verwendet werden. In einer anderen Ausführungsform ist vorgesehen, diese Permanentmagnete durch geeignet dimensionierte Magnetfeldspulen zu ersetzen. Derartige Magnetfeldspulen haben den Vorteil, daß durch einen entsprechend gewählten Stromfluß die gewünschten Magnetfelder eingestellt werden können. Nachteilig an der zweiten Ausführung ist jedoch, daß eine zusätzliche Stromquelle mit der Transporteinrichtung mitgeführt werden muß.

Neben der Magneteinrichtung stellt die Erfindung des weiteren eine Speicherzelle für ein kernspinpolarisiertes Gas, insbesondere polarisiertes ^3He zur Verfügung, umfassend einen Raum mit einer Wandung zur Aufnahme des polarisierten ^3He , wobei die erfindungsgemäße Speicherzelle dadurch gekennzeichnet ist, daß die Speicherzelle aus einem unbeschichteten Material besteht und zumindest die in das Innere des Aufnahme Raumes für das polarisierte Gas gerichtete Seite der Wandung im wesentlichen frei von paramagnetischen Substanzen ist. Auf diese Art und Weise wird erreicht, daß polarisiertes ^3He eine wandbedingte Depolarisationsrelaxationszeit T_1^w von mindestens 20 Stunden aufweist. Besonders bevorzugt ist es, wenn die wandbedingte Depolarisationsrelaxationszeit größer als 50 Stunden ist. Derartig hohe Depolarisationsrelaxationszeiten können dann erreicht werden, wenn als Zellenmaterial ein Material verwendet wird, dessen Anteil an paramagnetischen Atomen oder Molekülen sehr gering ist, wobei in einer besonders vorteilhaften Ausführungsform Gläser mit sehr geringen Eisenkonzentrationen, vorzugsweise kleiner als 20 ppm, verwendet werden, die auch derart ausgebildet sein können, daß sie gleichzeitig eine hohe Diffusionsbarriere gegenüber Helium darstellen, wie z.B. Supremex-Glas (Fa.Schott, Mainz) vom Typ der Aluminosilikatgläser. Gegenüber den bisher bekannten Speicherzellen aus W. Heil. H. Humblot, E. Otten, M. Schäfer, R. Surkau, M. Leduc, "Very long nuclear relaxation times of spin polarized helium 3 in metal coated cells"; Phys. Lett. A, 1995, 201, S. 337-343 können mit den

erfindungsgemäßen Speicherzellen, insbesondere aus eisenarmem Glas, lange wandbedingte Depolarisationsrelaxationszeiten erreicht werden, ohne daß eine aufwendige Metallbeschichtung der Wandung notwendig ist.

5 Gemäß einem dritten Gedanken der Erfindung ist vorgesehen, eine Transporteinrichtung für kernspinpolarisierte Gase, insbesondere ^3He , zur Verfügung zu stellen, die eine Magneteinrichtung und eine Speicherzelle zur Aufnahme des kernspinpolarisierten Gases umfaßt, wobei die Speicherzelle im Innenraum der Magneteinrichtung angeordnet ist und die Transporteinrichtung dadurch gekennzeichnet ist, daß das Magnetfeld der Magneteinrichtung im Innenraum des Magneten in dem Bereich, in dem die Speicherzelle angeordnet ist, derart homogen ist, daß die durch einen transversalen Magnetfeldgradienten nach Gleichung (3) bedingte Depolarisationsrelaxationszeit T_1^g größer als 200 Stunden, vorzugsweise
15 größer 500 Stunden, besonders bevorzugt größer als 750 Stunden ist und die wandbedingten Depolarisationsrelaxationszeiten aufgrund von Stößen des atomaren polarisierten Gases der Wand der Speicherzelle T_1^w größer als 20 Stunden ist.

Depolarisationsverluste entstehen aber nicht nur beim Transport des Gases aufgrund von eingestreuten äußeren Magnetfeldern und sich hieraus ergebenden Magnetfeldinhomogenitäten bzw. Stöße der Atome mit der Wand, sondern insbesondere auch bei der Entnahme des Gases aus dem Transportgefäß.

25 Erfindungsgemäß werden derartige Depolarisationsverluste dadurch minimiert, daß die Entnahme des polarisierten Gases nach folgendem Verfahren stattfindet:

30 Die als Topfmagnet ausgebildete Magneteinrichtung wird mit ihrer Achse und Richtung des inneren, homogenen Magnetfeldes parallel zu einem äußeren,

hinreichend homogenen Magnetfeld, das zum Beispiel mit Hilfe einer Helmholzspule oder dem Streufeld eines Kernspintomographen erzielt werden kann, aufgestellt. Es wird dann die Hälfte des Topfmagneten abgehoben, die dem homogenen Magnetfeld in axialer Richtung zugewandt ist. Die verbleibende Hälfte garantiert dann mit der magnetischen Äquipotentialfläche ihrer Polschuhe beispielsweise aus μ -Metall eine hinreichende Feldhomogenität im Bereich der Gaszelle. Die Entnahme der mit polarisiertem Gas gefüllten Speicherzelle aus den Magneten erfolgt in axialer Richtung innerhalb weniger Sekunden.

Die Erfindung soll nunmehr anhand der nachfolgenden Figuren beispielhaft beschrieben werden, ohne daß hierin eine Einschränkung zu sehen ist.

Es zeigen:

- Fig. 1: eine perspektivische Außenansicht der erfindungsgemäßen Transporteinrichtung;
- Fig. 2: einen Schnitt durch eine erfindungsgemäße Transporteinrichtung umfassend eine erfindungsgemäße Magneteinrichtung, die als Topfmagnet ausgebildet ist, sowie eine in deren Innerem angeordnete Speicherzelle für kernspinpolarisierte Gase;
- Fig. 3a-d: verschiedene Anordnungen zur Randfeldkompensation;
- Fig. 4: eine weitere Variante des erfindungsgemäßen Magneten;
- Fig. 5: den Verlauf des Betrages des relativen, radialen Gradienten G_r in radialer Richtung R des Topfmagneten für verschiedene Anordnungen der Feldquellen;
- Fig. 6: Relaxation der ^3He -Polarisation in einer Speicherzelle mit eisenarmem Glas, wobei das Volumen der Zelle beispielsweise 350 cm^3 und der Gasdruck 2,5 bar beträgt.
- Fig. 7a-b: Darstellung der Entnahme der Speicherzelle in einem äußeren Feld.

Figur 1 zeigt in einer perspektivischen Außenansicht eine Ausführungsform der erfindungsgemäßen Magneteinrichtung 1, die vorliegend als zweiteiliger zylinderförmiger Topfmagnet mit einem Oberteil 1.1 und einem Unterteil 1.2 ausgebildet ist. Des weiteren eingezeichnet ist die Rotationssymmetrieachse S des Topfmagneten sowie die Magnetfeldlinie von äußeren Magnetfeldern, beispielsweise dem Erdmagnetfeld. Besonders gut zu erkennen ist der Verlauf eines äußeren Magnetfeldes bzw. Streufeldes B_s^+ , das nicht in das Innere des Topfmagneten eindringt, sondern aufgrund des geringen magnetischen Widerstandes des vorzugsweise aus Weicheisenmaterial bestehenden Joches 2 um den Innenraum herumgeführt wird. Das Streufeld B_s^+ steht senkrecht auf den Jochböden und wird durch die im Inneren des Joches 2 angeordneten μ -Weicheisenpolschuhen homogenisiert.

Figur 2 zeigt einen axialen Schnitt durch die erfindungsgemäße Transporteinrichtung gemäß Figur 1 für kernspinpolarisierte Gase, insbesondere kernspinpolarisiertes ^3He , ^{129}Xe , umfassend die erfindungsgemäße Magneteinrichtung und einen in deren Inneren angeordneten Aufnahmebehälter für das kernspinpolarisierte Gas, der sich durch extrem lange Wand-Depolarisationsrelaxationszeiten auszeichnet.

Der topfförmige Magnet 1 umfaßt ein dosenförmiges Joch 2, vorzugsweise aus Weicheisen zur Rückführung des magnetischen Flusses und zur Abschirmung der äußeren Felder. Das dosenförmige Joch 2 wiederum besitzt zwei Jochböden als Mittelteil 2.1. Die Jochböden 2.1 haben in der dargestellten Ausführungsform die Form zweier kreisrunder Scheiben 2.1.1 und 2.1.2. Am Rand der Jochböden sind geschlossen umlaufende Bleche 2.2 bzw. 2.3 als Jochmantel angeordnet. Diese unterscheiden sich für die zwei in der linken und rechten Hälfte der Fig. 2 dargestellten Ausführungsformen. Die umlaufenden Bleche 2.2 bzw. 2.3 sind sowohl an der oberen Scheibe 2.1.1 wie auch an der unteren Scheibe 2.1.2 angeordnet, ergebend ein Ober- und ein Unterteil des Topfmagneten, die an den abgewinkelten Randblechen 2.2.1

in der links dargestellten, ersten Ausführungsform in der Mittelebene der Magneteinrichtung aneinanderstoßen. In der rechts dargestellten, zweiten Ausführungsform sind die Randbleche 2.3.1 derart beabstandet, daß eine Aufnahmeöffnung für Feldquellen 2.4, beispielsweise Permanentmagneten, in der Mittelebene 4 des Topfmagneten 1 ausgebildet wird. Der sich aufgrund der Anordnung der Feldquellen, beispielsweise der Permanentmagneten, in der Mitte zwischen oberem und unterem Randblech des Topfmagneten ergebende Feldlinienverlauf ist mit 6 bezeichnet. In der links dargestellten ersten Ausführungsform übersteigt die Höhe der beiden Jochmantelhälften 2.2 den Abstand der Jochböden 2.1.1, 2.1.2. In der Lücke zwischen Mantel und Boden ergibt sich die Möglichkeit der Anordnung von Feldquellen in einer Stirnflächenposition 2.5. Der sich für eine derartige Anordnung ergebende Feldlinienverlauf im Randbereich ist mit Ziffer 8 gekennzeichnet.

Für das homogene Feld im Inneren des Topfmagneten sind die beiden sich gegenüberliegenden Polschuhe 10.1 und 10.2 verantwortlich. Die Polschuhe sind in dem vorliegenden Ausführungsbeispiel im wesentlichen als homogenisierende μ -Metallplatten ausgebildet. μ -Metall ist ein Werkstoff mit einer sehr hohen homogenisierenden Kraft in bezug auf ein äußeres, beispielsweise ein eingestreutes, Magnetfeld B_s und zeichnet sich durch sehr geringe Remanenzen aus.

In vorliegendem Ausführungsbeispiel wurde μ -Metall A der Vacuumschmelze, Postfach 2253, 63412 Hanau mit folgenden magnetischen Eigenschaften verwendet:

| | | |
|----------------------------|--------------|-------------------------|
| Stat. Koerzitivfeldstärke: | H_c | $\leq 30 \text{ mA/cm}$ |
| Permeabilität: | $\mu_{(4)}$ | ≥ 30.000 |
| Maximalpermeabilität: | μ_{\max} | ≥ 70.000 |
| Sättigungsinduktion: | B_s | $\geq 0,65 \text{ T}$ |

ohne daß hierin eine Beschränkung auf diesen Werkstoff für die Erfindung zu sehen ist. Der Abstand zwischen den μ -Metallplatten wird durch insgesamt drei Abstandshalter 12, von denen vorliegend nur einer dargestellt ist, gewährleistet.

5

Das sich ergebende homogene Magnetfeld zwischen den Polschuhen 10.1 und 10.2 aus μ -Metall ist in vorliegender Darstellung mit der Bezugsziffer 14 bezeichnet. Wie der Darstellung gemäß Figur 1 zu entnehmen ist, wird im Inneren des Topfmagneten aufgrund der homogenisierenden Kraft des μ -Metalls unabhängig von äußeren Feldern ein besonders homogenes Magnetfeld erzielt, wohingegen in den Randbereichen, je nach Anordnung der Feldquellen, ein abweichender Feldverlauf 6 bzw. 8 auftritt. Werden die Feldquellen alleine in der Mittelebene 4, wie für den rechten Randbereich des Topfmagneten 1 dargestellt, angeordnet, so tritt ein beträchtlicher Teil des magnetischen Flusses aufgrund des geringeren magnetischen Widerstandes aus dem Mantel aus und greift verstärkend vom Rande her in das Feld zwischen den Polschuhen durch. Das Feld steigt daher zum Rand hin beträchtlich an, wodurch die angestrebte Homogenität bereits bei einem relativ geringen Abstand der beiden Polschuhe zueinander verletzt wird. Bei einer Anordnung der Permanentmagnete in Stirnposition auf den Topfböden, wie in Figur 2 für den linken Bereich des Magneten dargestellt, beobachtet man einen beträchtlichen Randabfall des Feldes zwischen den Polschuhen 10.1, 10.2, wie durch die Feldlinie 8 dargestellt, weil der dicht an die Polschuhe heranreichende Mantel das Randfeld auf sich zieht und schwächt.

15

20

25

Das aufgrund der extrem hohen Permeabilität der verwendeten μ -Metallplatten als Polschuhe 10.1, 10.2 im Zwischenraum sich ergebende sehr homogene Feld 14, kann durch das Einbringen eines magnetischen Widerstandes 16 zwischen die Polschuhe 10.1, 10.2 und das Joch 2.1.1. bzw. 2.1.2. noch weiter verstärkt werden. Vorzugsweise wird hierfür eine verformungsstabile, nichtmagnetische Platte, beispielsweise eine Kunststoffplatte 16 oder zwecks

30

Gewichtersparnis vorzugsweise eine Wabenstruktur verwendet. Die Platte 16 kann mit den Polschuhen 10.1, 10.2 verklebt werden und garantiert so die Ebenheit der Polschuhe 10.1, 10.2.

5 Im zentralen Mittelteil des Topfmagneten 1 befindet sich zwischen den beiden Polschuhen 10.1, 10.2 der Speicherbehälter 20 zur Aufnahme des polarisierten Gases. Der Behälter 20 ist vorzugsweise aus einem eisenfreien Glas hergestellt und besitzt eine Eisenkonzentration von beispielsweise kleiner als 20 ppm, und kann auch derart ausgebildet sein, daß gleichzeitig eine hohe Diffusionsbarriere gegenüber Helium ausgebildet wird. Durch diese Maßnahme werden wandbedingte Relaxationszeiten von mehr als 70 Stunden erreicht. Die Speicherzellen 20 können vor Gebrauch abgepumpt und beispielsweise wie in der Hochvakuumtechnik üblich, bis zum Verlust ihrer restlichen Wasserschichten ausgeheizt werden. Für die Erfindung ist diese
15 Maßnahme vorteilhaft, aber keinesfalls notwendig. Die Speicherzellen sind beispielsweise mit einem üblichen Glashahn 22 verschlossen und werden über einen Glasflansch 24 an die Füllstation für das polarisierte Gas angeschlossen.

Zur Bestimmung des Polarisationsgrades können innerhalb der Transporteinrichtung des weiteren noch eine Hochfrequenzspule 30, die die Speicherzelle 20 umschließt, sowie eine Detektionseinrichtung 32 vorgesehen sein. Diese zusätzlichen Einrichtungen sind aber optional und für eine erfindungsgemäße Transporteinrichtung keineswegs zwingend erforderlich.

25 Entscheidend für die Erfindung ist, daß eine Magneteinrichtung angegeben wird, die sich durch ein über ein sehr großes Volumen homogenes Magnetfeld im Inneren der Einrichtung auszeichnet, so daß ein hohes nutzbares Volumen in Relation zum Gesamtvolumen der Magneteinrichtung erreicht wird, wobei das homogene Feld im Inneren der Magneteinrichtung
30 auch durch externe Felder nicht gestört werden soll.

Die geringe erforderliche Magnetfeldstärke von $B_0 < 1\text{ mT}$ ermöglicht einerseits eine sehr leichte Bauweise aus dünnem Weicheisenblech als Joch und Polschuhe. Zum anderen verlangt sie eine besonders geringe Remanenz der Polschuhe, die daher vorzugsweise aus μ -Metall ausgebildet sind, um die Homogenitätsforderung (2) zu erfüllen.

In bezug auf die Bestimmbarkeit des Polarisationsgrades ist es vorteilhaft, wenn das homogene Haltefeld im Inneren des Magneten ein schwaches Magnetfeld mit einer Feldstärke kleiner $1,0\text{ mT}$ ist, da dann die im nT- bis μT -Bereich liegenden, durch die Kernspinpolarisation des Gases hervorgerufenen Magnetfelder noch ausreichend exakt mit Hilfe der einfachen Detektionseinrichtung 32 bestimmt und hieraus der Polarisationsgrad ermittelt werden kann. Dies ist vorteilhaft, wenn die Qualität des angelieferten Gases beispielsweise vor einer medizinischen Applikation geprüft werden soll.

Figur 3 zeigt die mit Hilfe von unterschiedlichen Anordnungen von Feldquellen für sich allein genommen oder in Kombination mit einer magnetischen Blende erzielten Feldverteilung im Randbereich, mit denen auch im Randbereich noch eine ausreichend homogene Feldverteilung sichergestellt wird.

Figur 3a zeigt eine Lösung, bei der die Permanentmagnete zum einen im Spaltbereich 2.4 und auf den Topfböden 2.1.1, 2.1.2 im Spaltbereich 2.5 angeordnet sind. Durch entsprechende Aufteilung der Permanentmagnete 2.4 auf die Anordnung in der Mitte 4 sowie die Anordnung auf den Topfböden 2.1.1, 2.1.2 kann der Randfeldzuwachs 6, der durch eine Anordnung der Permanentmagneten 25 in der Mitte zwischen den Topfböden hervorgerufen wird, wie dargestellt, durch den Randabfall 8 der auf den Topfböden angeordneten Permanentmagneten gerade kompensiert werden. Bei gleicher Magnetfeldstärke des einzelnen Permanentmagneten ergibt sich für das gezeichnete Höhe- zu Breiteverhältnis des Topfes eine optimale Verteilung derselben bei einem Zahlenverhältnis der Magnete von 6:8, wobei erstere Zahl für die Anzahl der Magnete, die in der Mittelebene 4 angeordnet ist, und

zweitere Zahl für die Anzahl der Magneten, die auf den Topfböden angeordnet ist, steht.

5 In Figur 3b ist eine mögliche Homogenisierung eines Randfeldes bei Verwendung von in der Mittelebene 4 angeordneten Permanentmagneten mit Hilfe einer magnetischen Blende 40 dargestellt. Eine derartige magnetische Blende wird beispielsweise von einem Weicheisenring gebildet, der zwischen Topf und Polschuhrand eingeführt wird und wie die Bleche 2.2, 2.3 umläuft. Ein derartiger Weicheisenring schließt das einstreuende Feld teilweise kurz und führt bei geeigneter Dimensionierung das Randfeld auf den Wert des Zentralfeldes zurück.

15 Die Figuren 3c und 3d zeigen mit den Figuren 3a und 3b vergleichbare Kompensationsmöglichkeiten, wobei in diesem Ausführungsbeispiel anstelle von Permanentmagneten als Feldquellen Magnetspulen 50, 52 in zentraler Anordnung im Bereich der Mittelebene 4 des Topfes bzw. in der Nähe der Topfböden verwendet werden.

Figur 3c zeigt die Kompensation durch ein geeignetes Verhältnis von in der Mitte angeordneten Feldquellen zu in der Nähe der Topfböden angeordneten Feldquellen und Figur 3d die Kompensation mit Hilfe einer magnetischen Blende 40.

25 In Figur 4 ist eine weitere Ausführungsform der Erfindung dargestellt. Aus Gewichtsgründen ist der Jochmantel doppelschalig aus sehr dünnen umlaufenden Blechen 200.1, 200.2 sowie 202.1 und 202.2 aufgebaut. Die umlaufenden Bleche 200.1 und 200.2 sowie 202.1 und 202.2 sind durch Abstandsringe 207 im festen Abstand angeordnet, so daß eine doppelte Abschirmung des Inneren des Topfmagneten 1 zustande kommt. Bei gleicher
30 Ableitfähigkeit magnetischer Flüsse über die Abschirmringe wie in einer einwandigen Ausführungsform gemäß Figur 1 können diese in ihrer Stärke

wesentlich dünner ausgebildet werden. Die umlaufenden Bleche sind über eine Schraubverbindung 204 bzw. 206 mit der oberen bzw. der unteren μ -Metallplatte des Topfmagneten verbunden. Die Polschuhe 10.1 bzw. 10.2 werden durch Abstandshalter oder einen Abstandsring 205 voneinander beabstandet. Das homogene Magnetfeld wird im wesentlichen im Innenraum 208 zwischen den Polschuhen ausgebildet. Als Quellen für ein auch im Randbereich homogenes Feld dienen wie in Abb. 3a die in den Zwischenraum 2.4 zwischen Ober- und Unterteil des Topfmagneten sowie zwischen Mantel und Boden eingebrachten Permanentmagnete 210.

Figur 5 zeigt den Verlauf des Betrages des relativen, radialen Gradienten $G_r = (\delta B_r / \delta r) / B_0$ gemessen 1,5 cm oberhalb der Spiegelebene 4 des Topfmagneten in radialer Richtung r für verschiedene Anordnungen der Permanentmagnete in bzw. an dem erfindungsgemäßen Topfmagneten. Die Kurve mit a zeigt den Verlauf, wenn Permanentmagnete nur im Spalt in der Mittelebene 4 angeordnet sind entsprechend Abb.2 rechts, sowie b den Verlauf bei Anordnung der Permanentmagnete in der Stirnposition auf den Topfböden gemäß Abb. 2 links. Bei beiden Anordnungen können die geforderten Homogenitäten nicht erzielt werden. Der mit c bezeichnete Verlauf zeigt den Verlauf des radialen Gradienten bei einer Aufteilung der Permanentmagnete auf die Anordnung in der Stirnposition sowie im Spalt in der Mittelebene gemäß Abb. 3a. Das Zahlenverhältnis der Magnete betrug bei dem in Kurve 3c dargestellten Verlauf 6:8, d.h. 6 Magnete wurden in der Mitte angeordnet und 8 an den Stirnseiten. Bei einem Polschuhabstand von 18 cm und einem Polschuhdurchmesser von 40 cm wird die Homogenitätsgrenze, die durch das strichpunktierte Band 400 dargestellt wird, vorliegend ein Wert von $G_r = 1,5 \times 10^{-3}/\text{cm}$ bei r ungefähr 13 cm erreicht. Diese Grenze 400 zeigt sich über die volle Höhe des Topfmagneten, so daß innerhalb des Topfmagneten ein nutzbares Transportvolumen von mehr als 6 Litern zur Verfügung gestellt wird, in dem die Homogenitätsbedingung $G_r \leq 1,5 \times 10^{-3}/\text{cm}$ erfüllt wird.

Figur 6 zeigt ein Meßprotokoll der Relaxation der ^3He -Polarisation in einer Speicherzelle aus eisenarmem Glas. Das Volumen der Speicherzelle beträgt 350 cm^3 , der Gasdruck $2,5\text{ bar}$. Wie dieser Abbildung zu entnehmen ist, wurde durch die Verwendung derartiger Gläser eine Relaxationszeit von mehr als 70 Stunden gemessen, wobei unter den Bedingungen dieser Messung die gradientenbedingte Relaxationszeit noch vernachlässigt werden konnte. Bringt man einen derartigen aus eisenarmem Glas bestehenden Aufnahmebehälter in den Topfmagneten im Bereich des homogenisierten Feldes ein, so ergibt sich als resultierende Gesamtrelaxationszeit $T_{\text{res}} = (1/T_1^g + 1/T_1^w)^{-1}$ von 64 h, wobei die gradientenbedingte Relaxationszeit von $T_1^g = 750\text{ h}$ und eine wandbedingte Relaxationszeit von $T_1^w = 70\text{ h}$ zugrundegelegt wurde.

In Figur 7a und b ist das erfindungsgemäße Verfahren zur Entnahme eines in einer Speicherzelle 20 einer Transporteinrichtung gemäß der Erfindung aufbewahrten Gases in der Nähe eines äußeren Magnetfeldes beispielsweise des Streufeldes B_{TS} eines Kernresonanzspintomographen dargestellt. Soll die Speicherzelle beispielsweise für eine medizinische Anwendung in das Feld B_{T} des Tomographen eingebracht werden, ohne daß es zu einer wesentlichen Depolarisation kommt, so schlägt die Erfindung wie in Figur 7a vor, die erfindungsgemäße Transporteinrichtung mit ihrem Feld B_0 parallel zu und in gleicher Richtung wie das äußere Magnetfeld B_{TS} , wie dargestellt, aufzustellen. Anschließend wird das dem Tomographen zugewandte Oberteil der Transporteinrichtung mit dem oberen Polschuh 10.1 in der eingezeichneten Pfeilrichtung 302 abgehoben. Hierdurch wird die Speicherzelle 20 frei zugänglich. Der geöffnete Zustand der in vorliegender Ausführungsform als Topfmagnet ausgebildeten Transporteinrichtung ist in Figur 7b dargestellt. Wie deutlich zu erkennen, ist die homogenisierende Kraft aufgrund des fehlenden Oberteiles des Topfmagneten reduziert. Gleichwohl sorgt der noch verbliebene untere Polschuh 10.2 dafür, daß die Magnetfeldlinien des resultierenden Feldes B_{res} senkrecht hierauf enden. Hierdurch gelingt es, das Magnetfeld B_{res} im Bereich der Speicherzelle 20 noch hinreichend zu

homogenisieren, d.h. einen parallelen Feldlinienverlauf, wie eingezeichnet, zu erreichen.. Die Speicherzelle kann dann in dem auch bei abgehobenem Oberteil noch weitgehend homogenen Feld B_{res} entlang Pfeil 304 in Richtung der Symmetrieachse entnommen werden, ohne daß es zu einer merklichen Depolarisation des Gases während der kurzen Zeit der Entnahme kommt.

Das gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren in der Speicherzelle enthaltene Gas verfügt auch nach seiner Entnahme in dem starken Magnetfeld des Kernspintomographen immer noch über einen ausreichenden Polarisationsgrad für die angestrebten Anwendungszwecke.

Mit der vorliegenden Erfindung wird somit eine Einrichtung zur Verfügung gestellt, die eine Lagerung und einen Transport von kernspinpolarisierten Gasen über lange Strecken und Zeiten, wie sie vor allem für einen absehbaren Einsatz in der Medizin benötigt wird, zur Verfügung stellt. Insbesondere zeichnet sich die Erfindung durch eine kostengünstige Bauweise, einfache Konstruktion, ein größtmögliches nutzbares Volumen und sehr geringes Gewicht aus, wobei zuverlässig äußere Streufelder abgeschirmt werden. Die Erfindung gibt somit erstmals ein Mittel an die Hand, das einen kommerziellen Einsatz von ^3He , ^{129}Xe beispielsweise im Bereich der Medizin möglich erscheinen läßt.

Betreffend zukünftiger Einsatzmöglichkeiten von ^3He , ^{129}Xe in der Medizin wird insbesondere auf die Verwendung von polarisierten ^3He , ^{129}Xe in einer brillanten, hochaufgelösten dreidimensionalen Kernspintomographie der Ventilation der menschlichen Lunge verwiesen.

Betreffend diese Anwendung wird auf die nachfolgenden Publikationen verwiesen, deren Offenbarungsgehalt vollumfänglich in die Anmeldung mitaufgenommen wird:

- Peter Bachert, Lothar R. Schad, Michael Bock, Michal V. Knopp, Michael Ebert, Tino Großmann, Werner Heil, Dirk Hofmann, Reinhard Surkau, Ernst W. Otten, "Nuclear Magnetic Resonance Imaging of Airways in Humans with Use of Hyperpolarized ^3He ", Magnetic Resonance in Medicine, 36: 192-196 (1996).
- M. Ebert, T. Großmann, W. Heil, D. Hofmann, E.W. Otten, R. Surkau, M. Leduc, P. Bachert, M. Bock, M.V. Knopp, L.R. Schad, H. Nilgens, M. Thelen, "Nuclear magnetic Resonance Imaging on Humans using Hyperpolarized ^3He ", THE LANCET, 347 (1996) 1297-1299.

Des weiteren wird ein kompakter Magnet in Leichtbauweise vorgestellt, der sowohl ein großräumig homogenes und kompaktes leicht transportables sowie in seinem Wert relativ niedriges Magnetfeld zur Verfügung stellt und insbesondere auch sämtliche Anforderungen in bezug auf die Abschirmung äußerer Magnetfelder, die zu einer Depolarisation der Kernspins führen kann, befriedigt. Die Verwendung handelsüblicher kleiner Permanentmagnete stellt sowohl in konstruktiver wie auch in wirtschaftlicher Hinsicht einen ganz entscheidenden Vorteil dar.

Hinzu kommt die extrem hohe Permeabilität und geringe Remanenz des μ -Metalls, die vorliegend erstmals zum Bau sehr dünner, also leichter und dennoch hochwirksamer Polschuhe zur Homogenisierung des Magnetfeldes verwendet werden.

Der geringe magnetische Fluß erlaubt des weiteren die Verwendung eines Joches aus dünnem Weicheisenblech, das gleichzeitig aufgrund der Topfform und der damit verbundenen Möglichkeit der radialen Ableitung äußere Störfelder ausreichend abschirmt.

In der vorliegenden Erfindung wird somit erstmals ein Magnet mit einem extrem günstigen Verhältnis von homogenem Feldvolumen zu totalem Volumen und sehr geringem Gewicht zur Verfügung gestellt.

5 In einer etwas verschlechterten Ausführungsform kann vorgesehen sein, anstelle der μ -Metallpolschuhe solche aus magnetisch weichem Eisen zu verwenden, was zwar die Qualität des Feldes mindert, aber insbesondere in bezug auf den Preis eine günstigere Variante darstellt. Auch ist die Ersetzung der Permanentmagnete durch funktionsgleiche Magnetfeldspulen möglich, um den notwendigen Fluß an den jeweilig gewünschten Stellen im Topfmagneten zu erzeugen.

15 Schlußendlich wird ein Verfahren zur Entnahme eines kernspinpolarisierten Gases aus der erfindungsgemäßen Topfeinheit angegeben, bei der der Polarisationsgrad auch in Anwesenheit äußerer Magnetfelder, beispielsweise eines Kernspintomographen, erhalten bleibt.

Patentansprüche

- 5 1. Magneteinrichtung (1) mit einem Innenraum, der ein großräumiges, weitgehend homogenes, abgeschirmtes Magnetfeld in seinem Inneren zur Verfügung stellt, wobei die Magneteinrichtung (1) homogenisierende μ -Metallbleche als Polschuhe (10.1, 10.2) umfaßt, die Magneteinrichtung ist dadurch gekennzeichnet, daß das Verhältnis von nutzbarem Volumen der Magneteinrichtung, in dem ein homogenes Magnetfeld vorliegt, zum Gesamtvolumen der Magneteinrichtung von 1:1,5 erreichbar ist und im nutzbaren Volumen die Homogenitätsbedingung

$$G_r \leq 1,5 \times 10^{-3} / \text{cm}$$

15 erfüllt ist, wobei G_r der relative transversale Magnetfeldgradient ist.

- 20 2. Magneteinrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Verhältnis von nutzbarem Volumen zu Gesamtvolumen mindestens 1:5, vorzugsweise 1:3, besonders bevorzugt 1:2 beträgt.
- 25 3. Magneteinrichtung nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Magneteinrichtung magnetische Feldquellen umfaßt, die derart angeordnet sind, daß die Feldfehler in den Randbereichen des Innenraumes so minimiert werden, daß das Feld im Innenraum weitgehend homogen ist.
- 30 4. Magneteinrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das homogene, abgeschirmte Magnetfeld ein schwaches Magnetfeld mit einer Feldstärke kleiner als 5,0 mT ist.

5. Magneteinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Polschuhe aus zwei dünnen Platten, umfassend ein μ -Metall oder Weicheisenmetall, gebildet werden.
- 5 6. Magneteinrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen den Polschuhen (10.1, 10.2) und den Jochböden (2.1.1, 2.1.2.) ein verformungsstabiles, nicht magnetisches Material vorgesehen ist.
7. Magneteinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Magneteinrichtung in Form eines zu öffnenden, geschlossenen Behälters ausgebildet ist.
8. Magneteinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Magneteinrichtung als ringförmiger Topfmagnet ausgebildet ist.
- 15 9. Magneteinrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß ein erster Teil der magnetischen Feldquellen (2.4) auf einem Spalt in der Mittelebene des Topfmagneten und ein zweiter Teil der magnetischen Feldquellen (2.5) in Stirnposition auf den Topfböden angeordnet ist, derart, daß der Randfeldzuwachs aufgrund der auf einem Spalt in der Mittelebene des Topfmagneten angeordneten Feldquellen durch den Randfeldabfall der in Stirnposition auf den Topfböden angeordneten Feldquellen kompensiert wird.
- 25 10. Magneteinrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß eine ferromagnetische Blende (40) und die Feldquellen (2.4) auf einem Spalt in der Mittelebene in dem zu nutzenden Feldraum derart angeordnet werden, daß ein eingestreutes Feld teilweise kurzgeschlossen wird und die magnetische Blende derart dimensioniert ist, daß das Randfeld auf den Wert des Zentralfeldes zurückgeführt wird.
- 30

11. Magneteinrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die magnetische Blende (40) ein μ -Metall- oder Weicheisenring ist.
12. Magneteinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die magnetischen Feldquellen Permanentmagneten sind.
13. Magneteinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die magnetischen Feldquellen Magnetfeldspulen sind, deren Magnetfeld über den elektrischen Strom eingestellt werden kann.
14. Magneteinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß der Jochmantel (200.1, 200.2, 202.1, 202.2) mehrschalig ausgeführt ist.
15. Speicherzelle für kernspinpolarisierte Gase, insbesondere ^3He , ^{129}Xe umfassend:
einen Raum mit einer Wandung zur Aufnahme des polarisierten ^3He , ^{129}Xe dadurch gekennzeichnet, daß die Speicherzelle aus einem unbeschichteten Material besteht und zumindest die in das Innere des Aufnahmeraumes gerichtete Seite der Wandung im wesentlichen frei von paramagnetischen Substanzen ist, so daß das kernspinpolarisierte Gas, insbesondere das ^3He , ^{129}Xe , eine wandbedingte Depolarisationsrelaxationszeit T_1^w von mindestens 5 Stunden aufweist.
16. Speicherzelle nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die wandbedingte Depolarisationsrelaxationszeit T_1^w größer als 50 Stunden ist.

17. Speicherzelle nach Anspruch 15 oder 16, dadurch gekennzeichnet, daß das Material der Innenseite der Wandung ein eisenarmes Glas ist.
18. Speicherzelle nach einem der Ansprüche 15 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß das Material der Innenseite der Wandung eine hohe Diffusionsbarriere gegen Helium aufweist.
19. Transporteinrichtung für kerspinpolarisierte Gase, insbesondere ^3He , ^{129}Xe mit einer Magneteinrichtung (1) und einer Speicherzelle (20) zur Aufnahme des kernspinpolarisierten Gases, insbesondere des ^3He , ^{129}Xe die im Innenraum der Magneteinrichtung angeordnet ist, dadurch gekennzeichnet, daß das Magnetfeld der Magneteinrichtung im Innenraum im Bereich der Speicherzelle (20) derart homogen ist, daß die durch einen transversalen Magnetfeldgradienten bedingte Depolarisationsrelaxationszeit T_1^g des Gases größer als 200 Stunden, vorzugsweise größer als 500 Stunden, besonders bevorzugt größer als 750 Stunden bei 3 bar Gasdruck ist und die wandbedingte Depolarisationsrelaxationszeit T_1^w aufgrund von Stößen des kernspinpolarisierten Gases mit der Wand der Speicherzelle größer als 5 Stunden ist.
20. Transporteinrichtung nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Magneteinrichtung eine Magneteinrichtung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 14 ist.
21. Transporteinrichtung nach Anspruch 19 oder 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Speicherzelle eine Speicherzelle gemäß einem der Ansprüche 15 bis 18 ist.
22. Verfahren zur Entnahme von in einer Speicherzelle aufbewahrten kernspinpolarisiertem Gas, insbesondere ^3He , ^{129}Xe aus einer

Transporteinrichtung gemäß einem der Ansprüche 19 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Transporteinrichtung mit ihrer Feldachse parallel zu einem äußeren, hinreichend homogenen Magnetfeld angeordnet wird;

- 5 anschließend wird die der äußeren Magnetfeldquelle zugewandte Hälfte des Topfmagneten abgehoben und die Speicherzelle enthaltend das kernspinpolarisierte Gas aus dem Topfmagneten in Richtung der Magnetfeldquelle entnommen.

Transporteinrichtung für kernspinpolarisierte Gase,
insbesondere Edelgase, wie Heliumisotop ^3He , ^{129}Xe

Zusammenfassung

5

Die Erfindung betrifft eine Magneteinrichtung mit einem Innenraum, der bei geringen Außenabmessungen und Gewicht ein großräumiges, weitgehend homogenes, abgeschirmtes Magnetfeld in seinem Inneren zur Verfügung stellt, wobei die Magneteinrichtung homogenisierende Bleche als Polschuhe umfaßt.

15

Die Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, daß das Verhältnis von nutzbarem Volumen der Magneteinrichtung, in dem ein homogenes Magnetfeld vorliegt, zum Gesamtvolumen der Magneteinrichtung von 1:1,5 erreichbar ist und im nutzbaren Volumen die Homogenitätsbedingung

$$G_r \leq 1,5 \times 10^{-3} / \text{cm}$$

erfüllt ist, wobei G_r der relative transversale Magnetfeldgradient ist.

Fig. 1

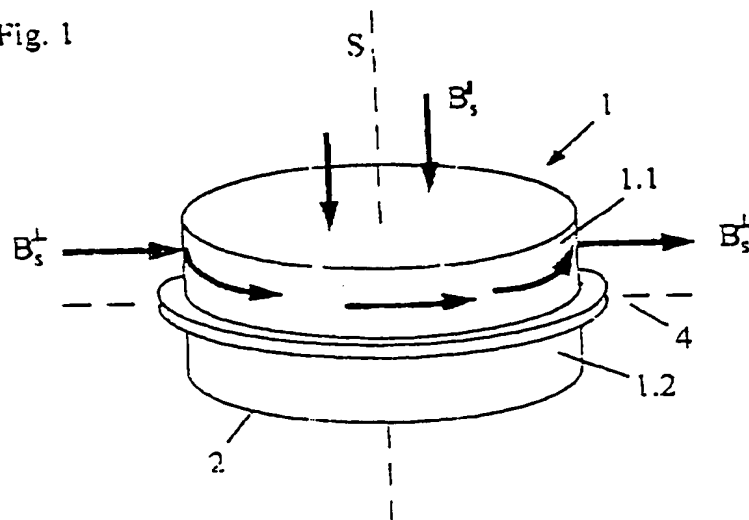
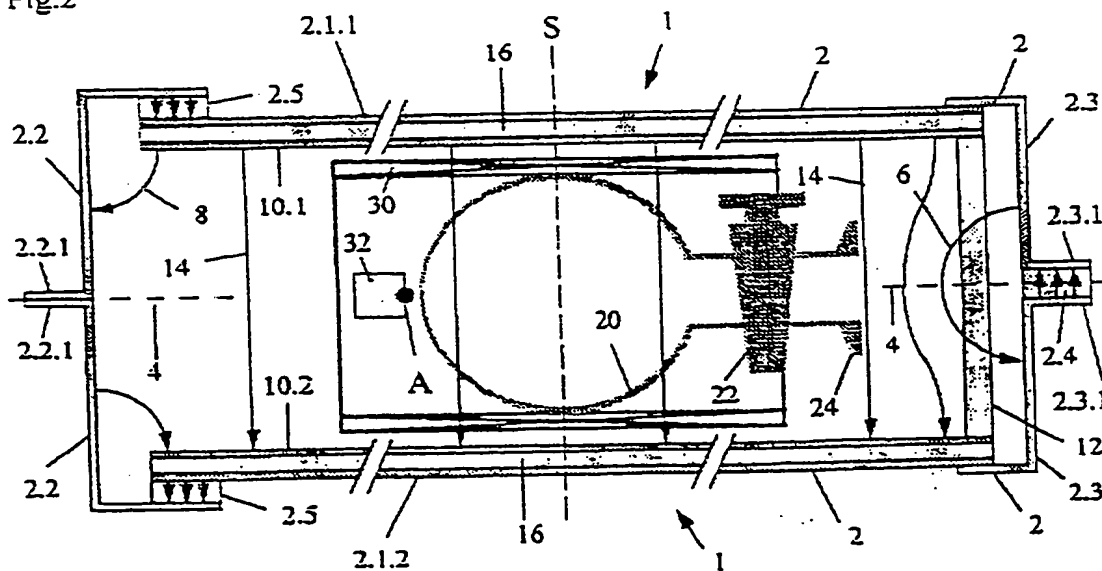


Fig. 2



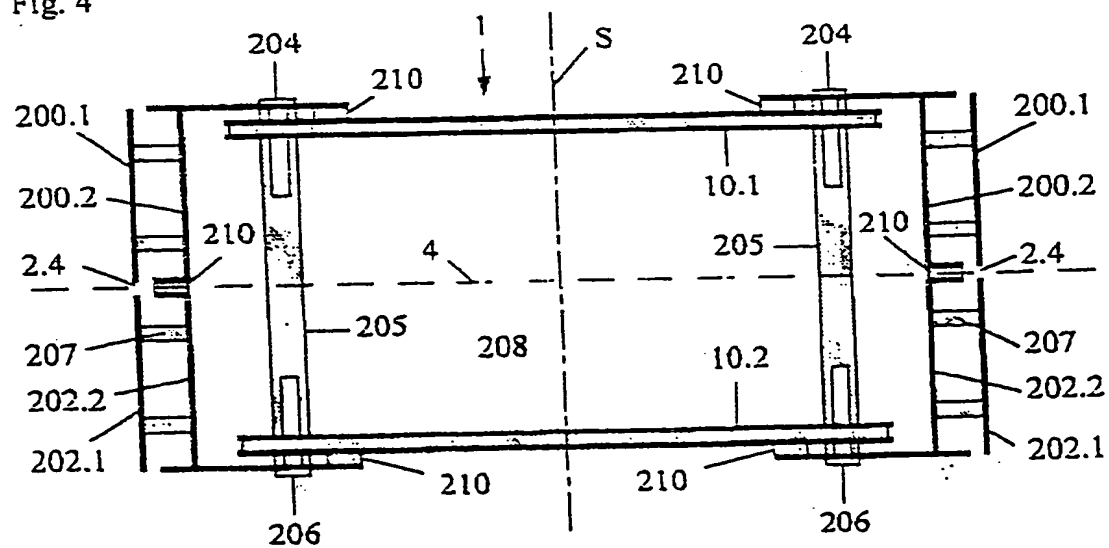


Fig. 5

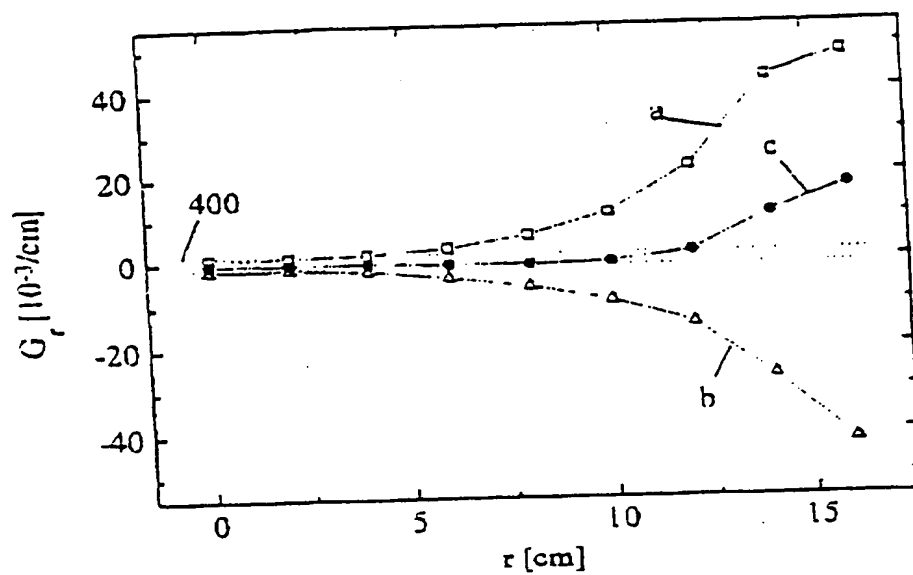


Fig. 6

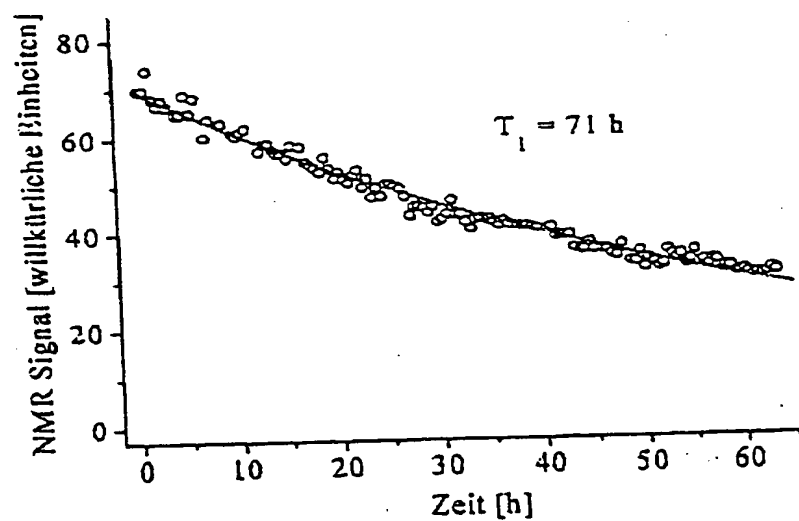


Fig. 7 a.)

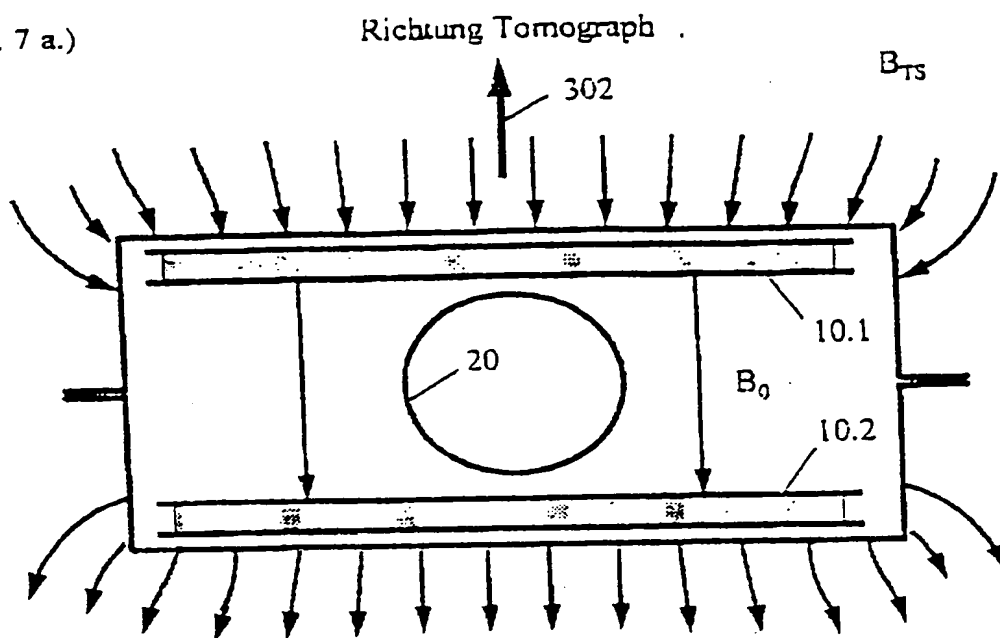


Fig. 7 b.)

